

# 块菌多糖的提取、结构、功能及应用研究进展

## Research progress on extraction, structural, functional properties and applications of *Tuber* polysaccharides

李盼<sup>1,2</sup> 曾祥权<sup>1,2</sup> 李倩倩<sup>3</sup> 李健<sup>1,2</sup>

LI Pan<sup>1,2</sup> ZENG Xiangquan<sup>1,2</sup> LI Qianqian<sup>3</sup> LI Jian<sup>1,2</sup>

(1. 北京工商大学食品与健康学院中国轻工工业植物基食品绿色低碳加工技术重点实验室, 北京 100048; 2. 北京工商大学食品与健康学院北京市食品添加剂工程技术研究中心, 北京 100048; 3. 北京市农林科学院质量标准与检测技术研究所, 北京 100097)

(1. Key Laboratory of Green and Low-carbon Processing Technology for Plant-based Food of China National Light Industry Council, School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 2. Beijing Engineering and Technology Research Center of Food Additives, School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 3. Institute of Quality Standard and Testing Technology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

**摘要:**多糖是食用菌的主要活性成分之一,被广泛应用于食品工业中。目前对块菌多糖提取的研究主要围绕溶剂提取法、超声波辅助提取法、微波辅助提取法、酶辅助提取法和加压液相萃取法等工艺。在化学结构的解析方面,主要针对其分子质量、单糖组成及比例、糖残基的构型及连接方式、多糖类型。而关于块菌多糖的生物功能,重点是评价其抗氧化、抗肿瘤、降血糖、抗疲劳、免疫调节等活性。此外,块菌多糖现阶段已成功被开发为糕点和含片类产品。文章对块菌多糖的提取、结构、功能及在食品加工中的应用研究进展进行了综述。

**关键词:**块菌多糖;提取工艺;化学结构;功能活性;应用

**Abstract:** Polysaccharides are the main active ingredients of edible fungi, which have been widely utilized in the food industry. As a member of the truffle family, *Tuber* are rich in polysaccharides. Previous studies mainly focused on solvent, ultrasound-assisted, microwave-assisted, enzyme-assisted and pressurized liquid extractions regarding the extraction methods of *Tuber* polysaccharides. The molecular weight, monosaccharide

composition and content, configuration, and ligation mechanism of sugar residues, along with the polysaccharide types of *Tuber* polysaccharides, have all been studied in relation to the characterization of chemical structures. Additionally, the antioxidant, antitumor, hypoglycemia, anti-fatigue, and immunomodulatory activities have been evaluated as well. In food processing, polysaccharides have been currently applied in the production of pastries and lozenges. Therefore, the purpose of this research is to discuss the most current developments in extraction techniques, including chemical structures, functional properties, and applications of *Tuber* polysaccharides. This provides a theoretical foundation for future growth in their food applications.

**Keywords:** *Tuber* polysaccharides; extraction methods; chemical structures; functional properties; applications

块菌(*Tuber*)为盘菌目块菌科块菌属的一类生长于地下的真菌,属于子囊菌(*Ascomycota*),是两大类松露(Truffle)之一。松露可分为块菌和沙漠松露两大类,而块菌通常被认为是盘菌目中“真正的”松露<sup>[1]</sup>,在澳大利亚、新西兰、中国和许多欧洲国家(如法国、意大利、英国、西班牙和克罗地亚)均有生长<sup>[2]</sup>。块菌孢子通常定植于树木或灌木的根部,形成外生菌根。宿主植物可以通过光合作用为块菌提供碳水化合物,而真菌促进宿主植物水和矿物质的吸收,同时释放生长素类激素吲哚-3-乙酸(IAA)和乙烯,促进宿主植物的根生长<sup>[3]</sup>,二者互惠共生。块菌子实体常呈直径为 2~10 cm 的椭圆形或不规则圆

**基金项目:**国家重点研发计划项目(编号:2022YFF1101500);北京工商大学食品科学与工程双一流学科培育项目(编号:BTBUYXTD202203);北京市教委科技项目一般项目(编号:KM202310011009)

**作者简介:**李盼,女,北京工商大学在读硕士研究生。

**通信作者:**曾祥权(1994—),男,北京工商大学讲师,博士。

E-mail: 20210803@btbu.edu.cn

李健(1985—),男,北京工商大学教授,博士。

E-mail: lijian@th.btbu.edu.cn

**收稿日期:**2023-06-20 **改回日期:**2023-11-22

形,颜色为黄褐色、深咖色或黑褐色,外表面装饰着明显的突疣,多为圆锥型或锥型,这些突疣被深网状的沟缝细痕分隔,而内表面具有深棕色和白色静脉结构<sup>[4]</sup>。块菌的种类繁多,主要分为黑袍块菌(*Tuber melanosporum*)、夏块菌(*Tuber aestivum*)、白蕈块菌(*Tuber magnatum*)、中国块菌(*Tuber sinense*)、印度块菌(*Tuber indicum*)、攀枝花块菌(*Tuber panzhihuanense*)、假凹陷块菌(*Tuber pseudoeccavatum*)、结核块菌(*Tuber regium*)、白松露(*Tuber borchii*)等,其中 *T. melanosporum*、*T. aestivum* 和 *T. magnatum* 在市场上的销售量最高。块菌中富含多种营养及生物活性成分,包括蛋白质、多糖、多酚、游离氨基酸、矿物质和不饱和脂肪酸等<sup>[1]</sup>,具有抗氧化、抗炎、抗菌、抗癌、抗抑郁和免疫调节等生物活性<sup>[5]</sup>,近年来,真菌多糖被广泛应用于食品、医药和化妆品等行业。

文章拟对块菌多糖的提取工艺、化学结构、功能活性及其在食品加工中的应用进行系统概述,以期对未来块菌多糖在食品工业中的推广应用提供依据。

## 1 块菌多糖的提取工艺

### 1.1 溶剂提取法

溶剂提取法是基于相似相溶的原理将目标化合物从混合组分中分离出来,具有经济、便捷的优点。但与此同时,溶剂提取法也存在耗时长和提取效率低的缺点。对于块菌多糖来说,常用的提取溶剂包括热水、碱、酸等。Wu 等<sup>[6]</sup>分别采用热水提取法和碱提取法提取 *T. regium* 多糖,两种溶剂提取的多糖组分 W-PTR 和 A-PTR 在颜色、溶解度、单糖和分子质量上均存在显著差异,且 W-PTP 的总糖含量(0.788 mg/mL)约为 A-PTP(0.478 mg/mL)的 2 倍。Zhao 等<sup>[7]</sup>优化了热水提取 *T. sinense* 块菌子实体多糖的工艺条件,其最佳条件为提取温度 94.75 °C、料液比 1 : 16.41 (g/mL)、提取时间 2.67 h,此条件下块菌多糖提取率为 10.44%。孔庆龙等<sup>[8]</sup>发现热水浸提法提取 *T. indicum* 多糖的最佳工艺条件为提取温度 94.68 °C、提取时间 3.71 h、料液比 1 : 58.66 (g/mL),此时块菌多糖提取率为 10.8%。岳金玫等<sup>[9]</sup>发现热水浸提法提取攀枝花块菌多糖的最佳工艺条件为提取温度 90 °C、提取时间 60 min、料液比 1 : 33 (g/mL),此时多糖提取率高达 13.32%,提取物中多糖含量为 71.55%。

### 1.2 超声辅助提取法

超声辅助提取法主要通过机械作用、热作用和空化作用破坏块菌细胞壁,使多糖组分从破裂细胞中释放出来,具有操作简便、耗时少、提取效率高、提取温度低等优点。Mudliyar 等<sup>[10]</sup>研究表明,超声辅助提取 *T. aestivum* 多糖的最佳工艺条件为 pH 6.5、振幅 25%、液固比 75 : 1 (mL/g)、提取时间 15 min,此条件下的提取率为 (68.91±1.54)%。黄治国等<sup>[11]</sup>优化了超声波辅助提取法提取攀枝花块菌多糖的工艺条件,得到最优方案为料液

比 1 : 30 (g/mL)、超声波处理温度 40 °C、超声波处理功率 100 W、超声波处理时间 60 min,其提取率可达 17.86%。蒲彪等<sup>[12]</sup>研究表明,超声辅助提取攀枝花块菌多糖的最佳工艺条件为超声功率 140 W、超声处理时间 36 min、超声处理温度 50 °C、料液比 1 : 40 (g/mL),此时块菌多糖提取率为 18.15%。与单纯的溶剂提取法相比,超声辅助提取法显著提升了块菌多糖的提取率。

### 1.3 微波辅助提取法

微波辅助提取法是利用微波产生的高频辐射,将块菌细胞组织击穿,从而使组织内部的多糖溶解出来。与此同时,块菌细胞组织吸收微波辐射转变的微波能,使组织温度迅速升高,加速细胞组织分解,从而使多糖类物质更快速地释放出来。清源<sup>[13]</sup>确定了微波提取块菌多糖的最佳工艺条件为微波功率 320 W、料液比 1 : 40 (g/mL)、微波时间 200 min,此条件下的多糖提取率高达 15.54%。Guan 等<sup>[14]</sup>设置微波辅助提取参数为微波功率 280 W、温度 70 °C、微波辅助提取 5 min 提取 *T. aestivum* 和 *T. melanosporum* 多糖,进一步分离纯化后得到 *T. aestivum* 和 *T. melanosporum* 多糖组分 TAP 和 TMP 分别为 12.97% 和 11.47%。

### 1.4 酶辅助提取法

酶辅助提取法是基于酶的水解作用对块菌细胞壁进行降解,使多糖组分溶于溶剂中,从而达到萃取的目的。相较于溶剂提取法,酶辅助提取法对环境更为友好,是绿色提取工艺之一。而用于食用菌多糖提取的常见消化酶有胰蛋白酶、木瓜蛋白酶、纤维素酶和果胶酶等<sup>[15-17]</sup>。Bhotmange 等<sup>[18]</sup>采用复合酶辅助提取法提取了 *T. aestivum* 多糖,其最佳提取条件为木瓜蛋白酶 1.0%、胰蛋白酶 1.0%、果胶酶 2.0%、提取时间 90 min、pH 6.0、提取温度 50 °C,此条件下多糖得率为 46.91%。清源等<sup>[19]</sup>确定了 *T. indicum* 多糖的酶法最佳提取工艺为  $m_{\text{中性蛋白酶}} : m_{\text{纤维素酶}} = 1 : 7$ 、酶用量 3.6%、酶解温度 41 °C、酶解时间 48 min、料液比 1 : 29 (g/mL)、pH 4.8,多糖的得率和含量分别为 14.5% 和 75.96%。岳金玫等<sup>[20]</sup>研究发现,酶辅助提取攀枝花块菌多糖的最佳工艺条件为 pH 5.6、酶解时间 65 min、酶解温度 61 °C、木瓜蛋白酶添加量 1.6%,此时多糖提取率为 14.31%,多糖含量高达 74.96%。此外,岳金玫<sup>[21]</sup>还考察了 4 种块菌多糖提取方法(热水浸提法、酶辅助提取法、超声波辅助提取法以及超声波协同酶法)对提取率的影响,发现酶辅助提取法(14.31%)、超声波辅助提取法(18.15%)相较于传统热水浸提法(13.32%)均能提高块菌多糖的提取率,而超声波协同酶法(20.91%)提取块菌多糖的提取率为热水提取法的 1.6 倍。

### 1.5 加压液相萃取法

加压液相萃取法是在密闭容器内,通过升高压力使

溶剂快速充满萃取池以加速块菌多糖的萃取,同时提高温度以增加块菌多糖在溶剂中的溶解度。Tejedor-Calvo 等<sup>[22]</sup>研究表明,加压液相萃取法提取 *T. aestivum* 多糖的最佳工艺条件为溶剂中  $V_{\text{水}} : V_{\text{乙醇}} = 1 : 1$ ,提取温度  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,提取时间  $30\text{ min}$ ,所提取的块菌多糖含量最高为  $69.3\%$ 。目前,借助加压液相萃取法提取块菌多糖的相关研究较少,后续可以进一步扩大该技术的应用范围。

## 2 块菌多糖的化学结构

如表 1 所示,目前国内外对块菌多糖化学结构的研究主要围绕不同种类块菌多糖的分子质量、单糖组成及比例、单糖残基的连接方式及构型、多糖构型等方面展开,并借助气相色谱-质谱(GC-MS)连用、核磁共振(NMR)、高效液相色谱法(HPLC)、高效凝胶渗透色谱(HPGPC)、体积排阻色谱(VEC)、紫外可见光谱法(UV-Vis)和傅里叶红外光谱法(FT-IR)等技术对块菌多糖的化学结构进行表征。不同块菌来源的多糖具有不同的单糖组成、连接单元和分子质量。其中,块菌多糖的分子质量范围为  $5.13 \sim 2.18 \times 10^4\text{ kDa}$ ,块菌的品种、生长环境、提取方法、纯化步骤等均会导致块菌多糖分子质量的差异。此外,从块菌中提取得到的多种不同的块菌多糖,其单糖组成通常由不同摩尔比的 Rha、Man、Glc 和 Gal 组成,各单糖残基主要通过 1,6-、1,4-以及 1,3-等连接。不同块菌多糖的糖苷键构型主要为  $\alpha$  构型,部分同时存在  $\alpha$  构型和  $\beta$  构型,且绝大多数块菌多糖为吡喃糖。

## 3 块菌多糖的功能活性

如表 2 所示,块菌多糖具有抗氧化、抗肿瘤、抗疲劳、降血糖和免疫调节等功能活性,与其独特的化学结构密切相关。

### 3.1 抗氧化活性

当机体自由基失衡过剩时,机体内的蛋白质、脂质、核酸等生物大分子会发生氧化损伤,导致衰老、心脑血管等疾病发生。孙娟等<sup>[32]</sup>对云南产印度块菌粗多糖的抗氧化活性进行了评价,发现印度块菌粗多糖对 DPPH 自由基、羟自由基具有较好的清除能力,且其铁离子螯合能力和还原能力较高。Wu 等<sup>[33]</sup>对比了借助热水提取法和碱提取法从 *T. regium* 块菌中提取得到的两种多糖组分 W-PTR 和 A-PTR 的抗氧化活性,两种多糖组分均具有明显的抗氧化活性。其中,W-PTR 对  $\text{O}_2^-$  自由基的清除能力强于 A-PTR,而 A-PTR 对羟自由基、DPPH 自由基的清除能力、肝脂质过氧化、肝线粒体肿胀和红细胞溶血的抑制作用强于 W-PTR。且多糖 A-PTR 比 W-PTR 含有更丰富的单糖组成,如阿拉伯糖等,能够作为供氢体与 DPPH 自由基和羟自由基反应。

不同分子质量块菌多糖的抗氧化活性也存在一定差异。岳金玫<sup>[21]</sup>对攀枝花产印度块菌粗多糖进行超滤,分

离得到了 3 种不同分子质量的块菌多糖组分 TIP-I ( $<50\text{ kDa}$ )、TIP-II ( $50 \sim 100\text{ kDa}$ ) 和 TIP-III ( $>100\text{ kDa}$ ),3 种多糖组分的抗氧化能力与其分子质量大小紧密相关,总还原能力和自由基清除能力大小顺序为  $\text{TIP-III} > \text{TIP-II} > \text{TIP-I}$ ,螯合铁离子能力大小顺序为  $\text{TIP-I} > \text{TIP-II} > \text{TIP-III}$ 。

### 3.2 抗肿瘤活性

近年来,块菌多糖被证明具有一定的抗癌作用,与其抑制癌细胞生长或诱导肿瘤细胞死亡的作用有关。Tao 等<sup>[34]</sup>从 *T. regium* 中提取的水溶性超支化  $\beta$ -葡聚糖,编码为 TM3b,在体内和体外均显示出有效的抗肿瘤活性,可以抑制肝癌细胞系 HepG2 细胞的生长。而 Zhao 等<sup>[35]</sup>从 3 个块菌子实体 (*T. indicum*, *T. himalayense*, *T. sinense*) 和 4 个块菌发酵体系 (*T. melanosporum*, *T. indicum*, *T. sinense*, *T. aestivum*) 中分离出 52 个多糖组分,各多糖组分对 HepG2、A549、HCT-116、SK-BR-3 和 HL-60 细胞增殖的抑制作用表现出明显的剂量依赖性。其中,从块菌发酵体系中分离出的多糖的最大细胞生长抑制率为  $69.95\%$ ,比从块菌子实体中分离出的高约  $16\%$ ,可能是块菌发酵体系分离出的多糖中  $\beta$ -D-葡聚糖的三螺旋构象在增强抗肿瘤活性方面发挥了重要作用。此外,通过分析其多糖组分的分子结构发现,过高的重均分子质量还可能会削弱抗肿瘤活性。

### 3.3 降血糖活性

多糖的降血糖活性通常与其对相关消化酶以及肝脏糖代谢过程中相关酶表达的抑制作用有关<sup>[36]</sup>。魏鑫悦等<sup>[37]</sup>测定了攀枝花块菌多糖的  $\alpha$ -葡萄糖苷酶和  $\alpha$ -淀粉酶的体外抑制作用,发现多糖组分对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶和  $\alpha$ -淀粉酶的  $\text{IC}_{50}$  值分别为  $1.99, 3.30\text{ mg/mL}$ 。Huang 等<sup>[38]</sup>从 *T. regium* 菌株发酵菌丝体中提取得到 3 种多糖组分 1P、2P 和 3P,可以显著降低糖尿病小鼠空腹血糖水平和糖化血红蛋白(HbA1c)水平,恢复糖尿病大鼠的胰岛素水平,且 1P 降低血糖作用比 2P 和 3P 的更明显。块菌多糖的降血糖作用可能归因于其抗氧化能力,在减少胰岛 B 细胞损伤和恢复胰岛素水平方面起关键作用。

### 3.4 抗疲劳活性

块菌多糖可以通过提高机体的糖原含量、提高机体肌肉组织中相关乳酸清除酶的活性、缓解机体蛋白质、氨基酸的分解代谢以及缓解机体氧化损伤来达到一定的抗疲劳效果。马宁<sup>[39]</sup>对印度块菌多糖 EPT 进行了体内抗疲劳试验,发现高剂量( $3\text{ g/kg BW}$ )EPT 处理能显著提高小鼠的力竭游泳时间,使游泳小鼠的肝糖原、肌糖原含量恢复到正常水平。EPT 还能显著提高小鼠组织细胞中的乳酸脱氢酶活性,加速肌肉中乳酸的清除代谢,防止肌肉中乳酸积累,降低小鼠血清中肌酸激酶活性、力竭游泳后小鼠的肌肉损伤程度、血清中尿素氮水平和机体蛋白质

表 1 块菌多糖的化学结构<sup>†</sup>  
Table 1 Chemical structures of *Tuber* polysaccharides

品种	提取方法	多糖组分	鉴定技术	分子量/kDa	单糖组成及比例	糖残基连接方式及构型	多糖构型	文献
<i>Tuber aestivum</i>	—	TAP	HPLC, FT-IR, NMR	$2.18 \times 10^6$	Rha-Ara-Xyl-Man-Glc-Gal (3.84 : 0.78 : 0.80 : 14.76 : 12.31 : 1.39)	$\alpha$ -D-Glc, $\alpha$ -D-Man, $\beta$ -d-Man, $\alpha$ -l-Rha	吡烷型杂多糖	[14]
<i>Tuber melanosporum</i>	—	TMP	HPLC, FT-IR, NMR	$8.79 \times 10^{3a}$	Rha-Man-Glc-Gal (1.15 : 5.43 : 10.94 : 0.62)	$\alpha$ -D-Glc, $\alpha$ -D-Man, $\beta$ -d-Man, $\alpha$ -l-Rha	吡烷型杂多糖	[14]
<i>Tuber regium</i>	热水提取法	W-PTP	HPGPC, GC, FT-IR	129.20 <sup>b</sup> , 163.70 <sup>a</sup>	Glc-Gal-GlcA (2.80 : 2.53 : 1.00)	—	$\beta$ -型吡喃糖	[23]
<i>Tuber regium</i>	碱提法	A-PTP	HPGPC, GC, FT-IR	85.20 <sup>b</sup> , 305.60 <sup>a</sup>	Glc-Gal-Ara-GlcA (3.14 : 3.23 : 1.00 : 4.04)	—	$\beta$ -型吡喃糖	[23]
<i>Tuber panshuhuaense</i>	—	TPZ-NP, TPZ-I, TPZ-II	GC-MS	TPZ-NP (5.13 <sup>a</sup> ), TPZ-I (30.84 <sup>a</sup> ), TPZ-II (17.43 <sup>a</sup> )	TPZ-NP; Rha-Gal-Man-Glc (5 : 13 : 1 : 2)	—	—	[24]
<i>Tuber pseudoxanthum</i>	—	TPD-NP, TPD-I	GC-MS	TPD-NP (8.37 <sup>a</sup> ), TPD-I (18.91 <sup>b</sup> )	TPD-NP; Rha-Gal-Man-Glc (8 : 26 : 1 : 4)	—	—	[24]
<i>Tuber sinaestricum</i>	—	TSP-I, TSP-II	VEC, GC-MS, FT-IR, NMR	TSP-I (666.00 <sup>b</sup> ), TSP-II (778.90 <sup>b</sup> )	Man,Rha,ManA,Ara,Gal	$\rightarrow$ 2)- $\alpha$ -Manp-(1 $\rightarrow$ , $\rightarrow$ 6)- $\beta$ -Glc-(1 $\rightarrow$ , $\rightarrow$ 4)- $\alpha$ -D-ManAp-(1 $\rightarrow$ , $\rightarrow$ 4)- $\alpha$ -D-ManA, $\alpha$ -L-Rha	—	[25]
<i>Tuber sinense</i>	水提醇沉法	TPS	HPGPC, GC-MS, NMR	77.20 <sup>a</sup>	Glc	$\rightarrow$ 4)- $\alpha$ -D-Glc-(1 $\rightarrow$ , $\rightarrow$ 6)- $\alpha$ -D-Glc-(1 $\rightarrow$ , $\rightarrow$ 6)- $\alpha$ -D-Glc-(1 $\rightarrow$	—	[26]
<i>Tuber sinense</i>	超声辅助提取法	PTS-A	GC-MS, NMR	728 <sup>a</sup>	Glc	$\rightarrow$ 6)- $\alpha$ -D-Glc-(1 $\rightarrow$	[ $\rightarrow$ 6] $\alpha$ -D-Glc (1 $\rightarrow$ 6) $\alpha$ -D-Glc(1 $\rightarrow$ ) <sub>n</sub>	[27]
云南高黎贡山产 <i>Tuber indicum</i>	水提醇沉法	TPI-1	GPC, FT-IR, NMR	UV-Vis, 757.91 <sup>b</sup>	D-Glc(88.94%), D-Man(11.9%)	—	$\alpha$ -型吡喃糖	[28]
四川攀枝花市产 <i>Tuber indicum</i>	水提醇沉法	TIP-A	HPGPC, GC-MS	17.50 <sup>c</sup>	D-Man, D-Glc, D-Gal, L-Rha (7 : 2 : 2 : 2)	—	—	[29]
云南产 <i>Tuber indicum</i>	水提醇沉法	TPI-2A	HPLC, GC, FT-IR, NMR	193.39 <sup>c</sup>	Glc	$\rightarrow$ 6)- $\alpha$ -D-Glc-(1 $\rightarrow$	$\alpha$ -型吡喃糖	[30]

<sup>†</sup> a 表示重均分子量; b 表示数均分子量; c 表示分子质量; Ara 表示阿拉伯糖; Rha 表示鼠李糖; Man 表示甘露糖; Gal 表示半乳糖; Glc 表示葡萄糖; ManA 表示甘露糖; Man 表示甘露糖; GalA 表示半乳糖醛酸; Xyl 表示木糖; Fuc 表示岩藻糖; GlcA 表示葡萄糖醛酸; GalA 表示半乳糖醛酸。

表 2 块菌多糖的功能活性

Table 2 Functional properties of *Tuber* polysaccharides

品种	提取方法	多糖组分	研究模型	功能活性	主要结果	文献
<i>Tuber indicum</i>	热水浸提法	—	DPPH 自由基、羟自由基清除能力,铁离子螯合能力,总还原能力测定	抗氧化	DPPH 自由基、羟自由基清除能力 EC <sub>50</sub> 值分别为 0.86,0.50 mg/mL,铁离子螯合能力、总还原能力 EC <sub>50</sub> 值分别为 0.63,2.30 mg/mL	[31-32]
<i>Tuber regium</i>	热水法/碱法	W-PTR、PTR	A- O <sub>2</sub> <sup>-</sup> 自由基、羟自由基清除能力测定,肝脂质过氧化、肝线粒体肿胀和红细胞溶血抑制能力测定	抗氧化	两种多糖组分的抗氧化能力均表现出浓度依赖性	[33]
<i>Tuber indicum</i>	超声波协同酶法	TIP-I、TIP-II、TIP-III	DPPH 自由基、羟自由基、O <sub>2</sub> <sup>-</sup> 自由基清除能力,铁离子螯合能力,总还原能力测定	抗氧化	DPPH 自由基 IC <sub>50</sub> 值分别 4.20,3.47,2.83 mg/mL;羟自由基 IC <sub>50</sub> 值分别为 2.42,2.15,1.67 mg/mL;O <sub>2</sub> <sup>-</sup> 自由基 IC <sub>50</sub> 值分别为 6.99,6.55,4.71 mg/mL;螯合铁离子 IC <sub>50</sub> 值分别为 2.70,3.06,3.91 mg/mL	[34]
<i>Tuber regium</i>	—	TM3b	体内肉瘤皮下接种试验、体外肝癌细胞 HepG2 增殖试验	抗肿瘤	抑制小鼠体内肉瘤的生长,在体外抑制肝癌细胞系 HepG2 的增殖	[35]
<i>Tuber melanosporum</i> 、 <i>Tuber indicum</i> 、 <i>Tuber sinense</i> 、 <i>Tuber aestivum</i> 、 <i>Tuber indicum</i> 、 <i>Tuber himalayense</i> 、 <i>Tuber sinense</i>	活性炭柱法;热水提取醇沉淀法	52 个多糖组分	体外 HepG2、A549、HCT-116、SK-BR-3 和 HL-60 细胞增殖抑制能力测定	抗肿瘤	各多糖组分对癌细胞增殖的抑制作用表现出明显的剂量依赖性,块菌发酵体系多糖对肿瘤细胞生长的最大抑制率为 69.95%	[36]
攀枝花黑松露	水提法	—	体外抑制 α-葡萄糖苷酶和 α-淀粉酶的活性测定	降血糖	α-葡萄糖苷酶 IC <sub>50</sub> 值为 1.99 mg/mL;α-淀粉酶 IC <sub>50</sub> 值为 3.30 mg/mL	[37]
<i>Tuber regium</i>	盐提醇沉法	1P、2P、3P	大鼠体内抗高血糖活性测定	降血糖	降低糖尿病大鼠血糖和 HbA1c 水平	[38]
<i>Tuber indicum</i>	酶法	EPT	小鼠体内抗疲劳试验	抗疲劳	提高运动小鼠的糖原含量、乳酸脱氢酶的活性、脂肪酸含量,降低肌酸激酶活性、丙二醛含量、羟自由基含量,缓解机体蛋白质和氨基酸的分解代谢等	[39]
<i>Tuber indicum</i>	超声波辅助热水浸提法	—	小鼠体内抗疲劳试验	抗疲劳	延长小鼠的肌肉耐受能力并提高小鼠的肝糖原储备	[40]
<i>Tuber sinense</i>	热水浸提法	CTP	体外试验:对小鼠脾淋巴细胞增殖的影响;对小鼠腹腔巨噬细胞吞噬中性红的影响;对小鼠腹腔巨噬细胞产生 NO 的影响 体内免疫调节试验:环磷酰胺免疫抑制模型	免疫调节	提高免疫抑制小鼠的胸腺指数,免疫抑制小鼠腹腔巨噬细胞对鸡红细胞的吞噬能力、外周血中红细胞数量以及血红蛋白含量	[41]
<i>Tuber sinica</i>	—	PST	体内免疫调节试验	免疫调节	增加小鼠外周血中白细胞数量,促进 T 淋巴细胞转化和绵羊红细胞所引起的迟发型超敏反应,提高血清抗体水平	[42]

和氨基酸的分解代谢,从而减缓肌肉力量的降低。此外,EPT 处理还可明显降低小鼠血清中羟自由基含量,血清、肌肉、肝脏中的丙二醛含量,增加小鼠血清中脂肪酸水平,说明块菌多糖能防止自由基造成的细胞结构和功能的损伤,利用脂肪酸氧化供能,从而减少肌糖原无氧酵解产生乳酸,达到一定的抗疲劳效果。李陆<sup>[40]</sup>通过印度块菌多糖灌胃小鼠的负重力竭游泳试验探究了块菌多糖的运动抗疲劳效果。研究表明,高、中、低 3 种剂量的块菌多糖处理组均可显著延长小鼠的平均力竭游泳时间。此外,各剂量多糖灌胃处理组小鼠的肝重系数均较对照组显著升高,且显著性随多糖剂量的增加而增大,说明块菌多糖能延长小鼠的肌肉耐受能力并提高小鼠的肝糖原储备,从而起到抗疲劳的作用。

### 3.5 免疫调节

块菌多糖能够通过影响免疫器官、免疫细胞、免疫分子、补体系统和细胞因子等对免疫系统进行调节。赵玲<sup>[41]</sup>对中华块菌 *T. sinense* 粗多糖 CTP 进行了体内外免疫活性测定,体外试验结果表明,CTP 对小鼠脾淋巴细胞增殖及腹腔巨噬细胞分泌 NO 的促进作用随 CTP 浓度的增加而增加。体内试验中,CTP 能显著促进免疫抑制小鼠胸腺指数的部分恢复,同时对免疫抑制小鼠脾脏指数也有一定的促恢复作用。此外,CTP 还能增强免疫抑制小鼠腹腔巨噬细胞对鸡红细胞的吞噬作用。其中,低剂量(50 mg/kg)CTP 可以显著增加免疫抑制小鼠外周血中白细胞数量,红细胞数量与血红蛋白含量。胡慧娟等<sup>[42]</sup>对 *T. sinica* 中提取得到的多糖 PST 进行了小鼠免疫调节活性评价,观察到 PST 不仅能增加小鼠脾脏的重量,增加小鼠外周血中白细胞数量,促进 T 淋巴细胞转化和绵羊红细胞所引起的迟发型超敏反应,还能提高小鼠血清的抗体水平,说明 PST 有明显的免疫调节活性。

## 4 块菌多糖在食品工业中的应用

块菌多糖在食品工业中的应用主要围绕研制糕点和含片类产品展开。华思宁<sup>[43]</sup>采用蛋白酶酶解和超声波等现代工艺技术预处理黑松露,使多糖等有效成分大量析出。随后将预处理溶液于 100 °C 恒温水浴锅中,在持续搅拌下加入葡萄糖酸钙和苹果酸锌溶液,最终在高压脉冲电场下处理 3 h 得到黑松露溶液。该溶液存在松露多糖螯合钙和螯合锌两种新型微量元素补充剂,可直接被人体吸收利用。在传统月饼馅料中加入 50% 的黑松露溶液制得月饼馅料后,按 2:8 或 3:7 的月饼面皮与馅料的比例制作月饼。与市面上已有的将黑松露直接粉碎加入馅料中制得的月饼相比,该工艺增加了馅料中黑松露多糖、松露多糖钙和多糖锌螯合物等有效成分,显著提高了月饼的营养价值,更加满足现代健康饮食的需求。

含片具有便于携带、方便食用等优点,受到许多消费者的喜爱。清源<sup>[13]</sup>以块菌为原料制备得到块菌多糖粉

后,选用甘露醇粉为填充剂、乳糖为甜味剂与其混匀,随后缓慢加入 70% 乙醇制软料,进行制粒、干燥、整粒和压片后得到多糖含片,以色泽、风味、口感和组织状态为感官指标对配方进行优化。当块菌多糖粉用量为 100 g,添加 2% 硬脂酸镁、20% 甘露醇粉、45% 乳糖以及体积分数为 70% 的乙醇,所得含片的甜味协调,口感最佳。鲜欣言<sup>[44]</sup>将块菌多糖提取液制成稠浸膏状后,采用湿法压片工艺制备得到了块菌多糖含片,当甘露醇、阿斯巴甜、柠檬酸、硬脂酸镁添加量分别为 65.0%、2.0%、0.1%、0.7% 时,含片的感官评价得分最高。块菌多糖含片的研制不仅丰富了块菌食品的形式,还在一定程度上推广了块菌多糖的保健功能价值。

## 5 结语

研究系统总结了块菌多糖的提取工艺、化学结构和功能活性及其在食品工业中的应用,为未来块菌多糖功能性食品的开发提供了一定的理论支撑。但目前关于块菌多糖的研究仍存在一定局限性,后续可以尝试借助其他方法继续优化块菌多糖的提取工艺,如超临界萃取法等。而对于块菌多糖的化学结构,还需进一步研究其主链骨架和螺旋构象等。此外,块菌多糖的其他潜在功能活性也有待进一步证明,如抗炎、抗菌和降胆固醇活性等。为了扩大块菌多糖的应用,可将其作为壁材递送不同生物活性成分以增强其稳定性及利用率,开发成新型乳液稳定剂提高乳液的稳定性或复合膜材料制备可食用薄膜或涂层以延长食品货架期,以及用于蛋白多糖复合物的制备实现新型脂肪代替物的开发,改善食品品质及营养价值。

### 参考文献

- [1] KHALIFA S A M, FARAG M A, YOSRI N, et al. Truffles: From Islamic culture to chemistry, pharmacology, and food trends in recent times[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 91: 193-218.
- [2] LEE H, NAM K, ZAHRA Z, et al. Potentials of Truffles in nutritional and medicinal applications: A review[J]. Fungal Biology and Biotechnology, 2020, 7(1): 1-17.
- [3] MONACO P, NACLERIO G, MELLO A, et al. Role and potentialities of bacteria associated with *Tuber magnatum*: A mini-review[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 1017089.
- [4] VETTER J, KRUSSELYI D. Complex chemical evaluation of the summer Truffle (*Tuber aestivum* Vittadini) fruit bodies[J]. Journal of Applied Botany and Food Quality, 2014, 87: 291-295.
- [5] TEJEDOR-CALVO E, MORALES D, MARCO P, et al. Effects of combining electron-beam or gamma irradiation treatments with further storage under modified atmospheres on the bioactive compounds of *Tuber melanosporum* Truffles[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 155: 149-155.
- [6] WU G H, HU T, HUANG Z L, et al. Characterization of water and alkali-soluble polysaccharides from *Pleurotus Tuber-regium*

- sclerotia[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 96(1): 284-290.
- [7] ZHAO L, WANG K, WANG X, et al. Optimization of extraction procedure for Chinese Truffle Tuber *sinense* polysaccharides and effect of the polysaccharides on phagocytosis of macrophage in vivo[J]. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, 2012, 11(10): 1 757-1 762.
- [8] 孔庆龙, 樊建, 赵天瑞. 块菌多糖提取工艺优化及粗多糖抗氧化性的测定[J]. *食品与发酵工业*, 2012, 38(12): 175-179.
- KONG Q L, FAN J, ZHAO T R. Optimization of extraction technique of polysaccharides from Truffles by response surface methodology and determination of crude polysaccharide antioxidant activity[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2012, 38(12): 175-179.
- [9] 岳金玫, 蒲彪, 陈安均, 等. 响应面法优化块菌多糖的提取工艺[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(19): 271-274.
- YUE J M, PU B, CHEN A J, et al. Optimization of the extraction technology of Truffles polysaccharides by response surface analysis [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33 ( 19 ): 271-274.
- [10] MUDLIYAR D S, WALLENIUS J H, BEDADE D K, et al. Ultrasound assisted extraction of the polysaccharide from *Tuber aestivum* and its in vitro anti-hyperglycemic activity[J]. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 2019, 20: 100198.
- [11] 黄治国, 刘燕梅, 卫春会, 等. 超声波辅助提取块菌多糖工艺优化[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(25): 8 751-8 755.
- HUANG Z G, LIU Y M, WEI C H, et al. Optimization of polysaccharides extracting process from Truffles assisted by ultrasonic[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(25): 8 751-8 755.
- [12] 蒲彪, 岳金玫, 陈安均, 等. 响应面法优化块菌多糖的超声波辅助提取工艺[J]. *核农学报*, 2013(7): 996-1 002.
- PU B, YUE J M, CHEN A J, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction process of polysaccharides from Truffles by response surface methodology[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2013(7): 996-1 002.
- [13] 清源. 块菌多糖含片的研制[J]. *食品工业*, 2017, 38(5): 40-42.
- QING Y. Study on the preparing technology of truffle polysaccharide Tablet[J]. *Food Industry*, 2017, 38(5): 40-42.
- [14] GUAN T, WEI X, XU P, et al. Comparison of structural and antioxidant activity of polysaccharide extracted from Truffles[J]. *Journal of Food Science*, 2022, 87(7): 2 999-3 012.
- [15] YUE K, PAN Z H, SUN Y M. Optimization of composite enzymatic extraction of polysaccharide from *Thelephora ganbajun* Zang by mixture design [J]. *Storage and Process*, 2018, 18 ( 5 ): 91-96.
- [16] SUN Y, HE H, WANG Q, et al. A review of development and utilization for edible fungal polysaccharides: Extraction, chemical characteristics, and bioactivities[J]. *Polymers*, 2022, 14(20): 4 454.
- [17] LEONG Y K, YANG F C, CHANG J S. Extraction of polysaccharides from edible mushrooms: Emerging technologies and recent advances[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 251: 117006.
- [18] BHOTMANGE D U, WALLENIUS J H, SINGHAL R S, et al. Enzymatic extraction and characterization of polysaccharide from *Tuber aestivum* [J]. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 2017, 10: 1-9.
- [19] 清源, 陈甜甜. 块菌多糖复合酶法提取工艺优化[J]. *食品与机械*, 2018, 34(10): 174-178.
- QING Y, CHEN T T. Optimization of the extraction of truffle polysaccharide by multi-enzyme hydrolysis[J]. *Food & Machinery*, 2018, 34(10): 174-178.
- [20] 岳金玫, 蒲彪, 周月霞, 等. 响应面法优化块菌多糖的酶法辅助提取工艺[J]. *食品科学*, 2013, 34(2): 119-124.
- YUE J M, PU B, ZHOU Y X, et al. Optimization of enzymatic extraction of polysaccharides from Truffles by response surface methodology[J]. *Food Science*, 2013, 34(2): 119-124.
- [21] 岳金玫. 攀枝花块菌多糖的提取、纯化及抗氧化活性研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2013: 57-58.
- YUE J M. Extraction, purification and antioxidant activities of polysaccharides from *Panzhuhua* Truffles [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2013: 57-58.
- [22] TEJEDOR-CALVO E, GARCÍA-BARREDA S, SÁNCHEZ S, et al. Application of pressurized liquid extractions to obtain bioactive compounds from *Tuber aestivum* and *Terfezia clavaryi*[J]. *Foods*, 2022, 11(3): 298.
- [23] WU G H, HU T, HUANG Z L, et al. Characterization of water and alkali-soluble polysaccharides from *Pleurotus Tuber-regium sclerotia*[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 96(1): 284-290.
- [24] LI X, ZHU Z, YE L, et al. Comparison of the partial structure and antioxidant activity of polysaccharides from two species of Chinese Truffles[J]. *Molecules*, 2020, 25(18): 4 345.
- [25] LI X, ZHANG B, LI J, et al. Purification, characterization, and complement fixation activity of acidic polysaccharides from *Tuber sinoaestivum* [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 85: 82-88.
- [26] LI M, ZHANG X, ZHANG Y, et al. Study on the characterization of polysaccharide from *Tuber sinense* and its desensitization effect to  $\beta$ -lactoglobulin in vivo[J]. *Journal of Functional Foods*, 2022, 91: 105028.
- [27] ZENG C, CHEN X, JIANG W, et al. Isolation, purification and antioxidant activity of the polysaccharides from Chinese Truffle *Tuber sinense*[J]. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research: IJPR*, 2020, 19(1): 436.
- [28] 赖婷. 块菌多糖的提取纯化、结构鉴定及其羧甲基改性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016: 46-54.
- LAI T. Extraction, purification, structure analysis and carboxymethylation of polysaccharides from *Tuber indicum* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016: 46-54.
- [29] 罗强, 颜亮, 吴俐莎, 等. 印度块菌水溶性多糖的单糖组成与抗氧化活性研究[J]. *食品科学*, 2010(23): 52-56.
- LUO Q, YAN L, WU L S, et al. Monosaccharide compositions and antioxidant activity of water-soluble polysaccharide isolated from *Tuber indicum*[J]. *Food Science*, 2010(23): 52-56.

- [30] 孔庆龙. 印度块菌多糖的分离纯化、结构表征及抗氧化性研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013: 41-46.  
KONG Q L. Isolation and purification, structural characterization and antioxidant properties of polysaccharides from Tuber indicum [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013: 41-46.
- [31] TEJEDOR-CALVO E, MORALES D, MARCO P, et al. Screening of bioactive compounds in Truffles and evaluation of pressurized liquid extractions (PLE) to obtain fractions with biological activities[J]. *Food Research International*, 2020, 132: 109054.
- [32] 孙娟, 郑朝辉, 刘磊, 等. 4 种珍稀食用菌粗多糖的抗氧化活性研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2011, 38(3): 404-409.  
SUN J, LIU C H, LIU L, et al. Antioxidant activities of crude polysaccharides from four valuable ediblefung[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2011, 38(3): 404-409.
- [33] WU G H, HU T, LI Z Y, et al. In vitro antioxidant activities of the polysaccharides from *Pleurotus tuber-regium* (Fr.) Sing [J]. *Food Chemistry*, 2014, 148: 351-356.
- [34] TAO Y, ZHANG L, CHEUNG P C K. Physicochemical properties and antitumor activities of water-soluble native and sulfated hyperbranched mushroom polysaccharides [ J ]. *Carbohydrate Research*, 2006, 341(13): 2 261-2 269.
- [35] ZHAO W, WANG X H, LI H M, et al. Isolation and characterization of polysaccharides with the antitumor activity from Tuber fruiting bodies and fermentation system[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014, 98(5): 1 991-2 002.
- [36] ZHANG B, ZHANG X, YAN L, et al. Different maturities drive proteomic and metabolomic changes in Chinese black truffle [J]. *Food Chemistry*, 2021, 342: 128233.
- [37] 魏鑫悦, 陈克保, 关统伟. 攀枝花黑松露多糖的抗氧化和降血糖活性[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(3): 1-7.  
WEI X Y, CHEN K B, GUAN T W. Antioxidant and hypoglycemic activity of polysaccharide from Panzhuhua black Truffle[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2022, 38(3): 1-7.
- [38] HUANG H Y, KORIVI M, CHAING Y Y, et al. *Pleurotus Tuber-regium* polysaccharides attenuate hyperglycemia and oxidative stress in experimental diabetic rats [ J ]. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2012, 2 012: 856381.
- [39] 马宁. 块菌 (*Tuber indicum*) 干燥技术及块菌多糖抗疲劳作用机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017: 83-95.  
MA N. Studies on drying technology of Tuber indicum and its polysaccharide antifatigue mechanisms [ D ]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017: 83-95.
- [40] 李陆. 块菌胞外多糖合成机制和运动抗氧化作用[J]. *中国食用菌*, 2020, 39(3): 44-46.  
LI L. The mechanism of extracellular polysaccharide synthesis and exercise antioxidation of Tuber indicum[J]. *Chinese Edible Fungi*, 2020, 39(3): 44-46.
- [41] 赵玲. 块菌多糖的制备及其免疫调节活性研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2013: 62-68.  
ZHAO L. Preparation and immunomodulatory activities of polysaccharide from Tuber [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2013: 62-68.
- [42] 胡慧娟, 李佩珍, 林涛, 等. 块菌多糖对小鼠肿瘤及免疫系统的影响[J]. *中国药科大学学报*, 1994, 25(5): 289-292.  
HU H J, LI P Z, LIN T, et al. Effects of polysaccharide of Tuber Sinica on tumor and immune system of mice[J]. *Journal of China Pharmaceutical University*, 1994, 25(5): 289-292.
- [43] 华思宁. 黑松露月饼制作方法及其包装设计[J]. *中国食用菌*, 2020, 39(11): 121-124.  
HUA S N. Production method and packaging design of Tuber melanosporum moon cake[J]. *Chinese Edible Fungi*, 2020, 39(11): 121-124.
- [44] 鲜欣言. 攀西块菌成分分析及产品研发[D]. 成都: 西华大学, 2015: 36.  
XIAN X Y. Analysis of nutritional composition and product research and development in Panxi Truffles[D]. Chengdu: Xihua University, 2015: 36.

(上接第 96 页)

- [20] 崔涛, 刘佳, 杨丽, 等. 基于高速摄像的玉米种子滚动摩擦特性试验与仿真[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(15): 34-41.  
CUI T, LIU J, YANG L, et al. Experiment and simulation of rolling friction characteristics of corn seeds based on high-speed photography [ J ]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(15): 34-41.
- [21] FEI D, WU Y Z, ZHENG S H, et al. Experiment on Poisson's ratio determination about corn kernel[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 2 606(781/782/783/784): 799-802.
- [22] COŞKUN M B, YALÇIN I, ÖZARSLAN C. Physical properties of sweet corn seed (*Zea mays saccharata* Sturt.) [J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 74(4): 523-528.
- [23] 史嵩, 张东兴, 杨丽, 等. 基于 EDEM 软件的气压组合孔式排种器充种性能模拟与验证[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(3): 62-69.  
SHI S, ZHANG D X, YANG L, et al. Simulation and verification of filling performance of pneumatic combination hole seed dispenser based on EDEM software[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(3): 62-69.
- [24] WANG L J, LI R, WU B X, et al. Determination of the coefficient of rolling friction of an irregularly shaped maize particle group using physical experiment and simulations[J]. *Particology*, 2018, 38: 185-195.
- [25] 贾振超, 张宗超, 李寒松, 等. 基于 EDEM 的齿爪粉碎机玉米粉碎仿真分析[J]. *饲料工业*, 2020, 41(7): 31-37.  
JIA Z C, ZHANG Z C, LI H S, et al. Simulation analysis of corn crushing with tooth and claw mill based on EDEM [J]. *Feed Industry*, 2020, 41(7): 31-37.